

Zdravko Žagar
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje

Tiksotropno injekcijsko prešanje (*Thixomoulding*[®])

ISSN: 0351-1871

UDK: 678.027.7:669.721

Pregledni rad / Review article

Primljeno / Received: 14. 1. 2005.

Prihvaćeno / Accepted: 7. 3. 2005.

Sažetak

Postupak tiksotropnoga praoblikovanja razvijen je ranih sedamdesetih godina prošloga stoljeća kao inačica tlačnoga lijevanja metala. Svrstava se u postupke praoblikovanja metala i metalnih slitina u trajne kalupe. Tvrtka *Dow Chemical* patentirala je postupak tiksotropnoga injekcijskoga prešanja koji je po svojim obilježjima sličan injekcijskome prešanju plastomera.

U radu je opisan postupak tiksotropnoga injekcijskoga prešanja magnezijevih slitina. Dani su podatci o činiteljima tehnološkoga postupka izradbe otpresaka. Opisana su svojstva i prikazan je dijagram slijevanja magnezijevih slitina koje se koriste pri injekcijskom prešanju. Priložena je mikrografska snimka ispitka načinjenoga injekcijskim prešanjem slitine AZ91.

Skicom presjeka prikazani su osnovni dijelovi ubrizgavalice. Opisane su pojedinosti konstrukcije kalupa. Istaknute su prednosti i nedostaci postupka. Na kraju rada dana su predviđanja budućnosti tiksotropnoga injekcijskog prešanja.

KLJUČNE RIJEČI

injekcijsko prešanje
magnezijske slitine
tiksotropija
tiksotropno injekcijsko prešanje
trajni kalupi

KEYWORDS

injection moulding
magnesium alloys
permanent moulds
thixomoulding
thixotrophy

Injection moulding of magnesium alloys (*Thixomoulding*[®])

Summary

Thixotropic moulding was developed in the early 1970s as a variant of die casting of metals and is a method of casting metals and metal alloys in permanent moulds. Down Jones patented thix-

otropic injection moulding with properties similar to injection moulding of plastics.

The present paper describes thixotropic injection moulding of magnesium alloys. Data on factors in the technology of moulding production are given. Properties are described and a phase diagram for magnesium alloys used in injection moulding is given. Attached is a micrographic picture of the specimen produced by the injection moulding process of AZ91 alloy.

The cross section of the injection unit shows its main parts, as well as the design details for moulds to be used in thixomoulding. The advantages and disadvantages of the procedure are discussed, and in conclusion an assessment is made of the future of the thixotropic injection moulding procedure.

Uvod / Introduction

Postupak tiksotropnoga^a praoblikovanja razvijen je ranih sedamdesetih godina prošloga stoljeća. U početku je to bila inačica tlačnoga lijevanja metala jer su se za taj postupak rabile tlačne lijevalice. Stoga se radi o tiksotropnome tlačnom lijevanju (e. *thixocasting*). Vrlo brzo su uočene velike mogućnosti tiksotropnoga injekcijskoga prešanja, toga novoga inovativnoga postupka, pa su razvijene specijalizirane ubrizgavalice za taj postupak praoblikovanja s pužnim vijkom. Taj se postupak temelji na patentu tvrtke *Dow Chemical/Thixomat* koji je istekao 2002.¹

Po svojim obilježjima tiksotropno injekcijsko prešanje slično je injekcijskome prešanju plastomera.¹ Stoga se specijalne ubrizgavalice za tiksotropno injekcijsko prešanje mogu upotrijebiti za preradbu plastomera, dok obrat ne vrijedi. Navedena sličnost postupaka rukovodila je autora pri odabiru hrvatskoga naziva.

Danas je tiksotropno injekcijsko prešanje jedan od postupaka injekcijskoga prešanja i nije alternativa tlačnome lijevanju.

Zaokruženosti radi valja navesti da postoji i postupak preoblikovanja magnezijevih slitina, tiksotropno kovanje (e. *thixoforging*).

Oba postupka tiksotropnoga praoblikovanja, pretežno magnezijevih slitina, svrstavaju se uz kokilno lijevanje, niskotlačno lijevanje, tlačno lijevanje i centrifugalno lijevanje, u postupke praoblikovanja metalnih slitina u trajnim kalupima.

U nastavku će se razmatrati isključivo tiksotropno injekcijsko prešanje. Pri preradbi magnezijevih slitina taljevine je vrlo niske prividne viskoznosti od oko 10 Pa s. Vremena ubrizgavanja su od 10 do 100 ms, a temperatura preradbe su oko 600 °C. Tlakovi ubrizgavanja su oko 1000 bar, a naknadni tlakovi oko 600 bar.^{1,b}

Pri tiksotropnome injekcijskom prešanju u cilindru se za taljenje slitina zagrije na temperaturu ispod tališta i u djelomično je čvrstom,

^aTiksotropija je vremenski ovisno ponašanje tekućine kojoj opada prividna viskoznost tijekom djelovanja smičnoga naprezanja. Po prestanku smičnoga naprezanja, prividna viskoznost koja je obilježje strukturno-viskoznih tvari, poprima istu ili blisku vrijednost poslije određenoga vremena oporavka.² Prividna je viskoznost omjer smičnoga naprezanja i smične brzine, pri čemu smična brzina nije stalna.³ Stoga se smična viskoznost mijenja zbog promjene smične brzine ili tijekom vremena. Tekućina (e. *fluid*) je zajedničko ime za kapljevine (e. *liquid*) i plinove (e. *gas*).

^bNalik na čvrsto stanje.

čvrstastom² stanju (e. *semi-solid state*). Tijekom vremena djelovanjem smičnoga naprezanja materijalu se snizuje smična viskoznost (tikotropija), te se kao smjesa kapljevite faze i sferoidalnih čvrstih čestica ubrizgava u kalupnu šuplinu, gdje očvršćuje u otpresak.

Svoj sve zapaženiji razvoj tikotropno injekcijsko prešanje magnezijevih slitina zahvaljuje automobilskoj industriji koja je s velikim sredstvima financirala razvoj. U automobilskoj industriji trajno je nastojanje sniženje mase automobila. Stoga se pri izradbi dijelova zamjenjuju cinkove, aluminijske i željezne slitine s magnezijevim slitinama. Kod tikotropnoga injekcijskoga prešanja magnezijevih slitina gotovo je isključena opasnost od zapaljenja magnezija.

Stoga je izradba automobilskih dijelova tim postupkom jednostavnija i jeftinija od tlačnoga lijevanja Mg-slitina, uz sve mjere zaštite od požara. Slika 1 prikazuje više otpresaka načinjenih tikotropnim injekcijskim prešanjem.⁴



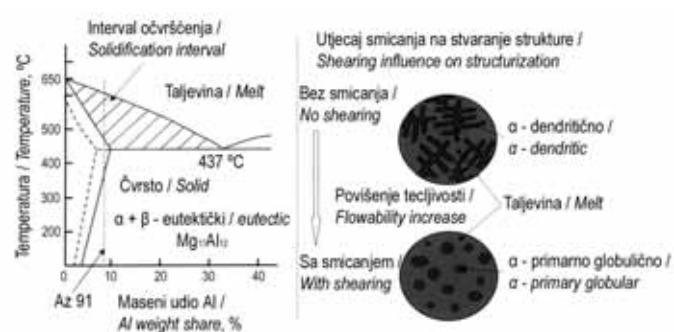
SLIKA 1. Tikotropno injekcijski prešani dijelovi⁴
FIGURE 1. Mouldings made by *Tixomoulding* ⁴

Slitine namijenjene tikotropnome injekcijskom prešanju / Alloys for thixomoulding

Osim magnezijevih slitina tim se postupkom prerađuju i aluminijske slitine. Poznata su uspješna istraživanja, ali i komercijalno tikotropno injekcijsko prešanje slitina višega tališta: bakra, kobalta i titana te nehrđajućih i alatnih čelika.⁵ Uspješnost postupka potiče daljnja istraživanja. Nedostatak tržišta tih otpresaka ograničuje ulaganja u tom smjeru.

Kvaliteta slitine vrlo je važan čimbenik visoke kvalitete otpresaka. Za ovaj su postupak pogodne slitine sa širokim intervalom očvršćivanja. Pri očvršćivanju primarni kristali trebaju biti sferoidalnoga oblika i okruženi fazom nižega tališta. Najčešće su to eutektičke slitine. Slitine za tikotropno injekcijsko prešanje prave se kontinuiranim lijevanjem u posebno kontroliranim uvjetima kristalizacije.

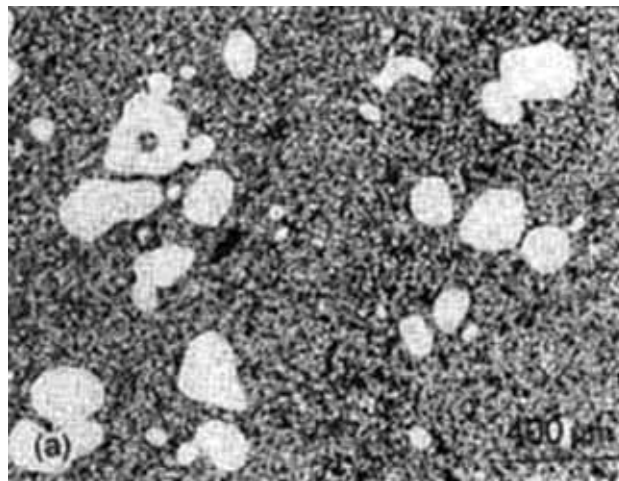
Na slici 2 prikazan je dijagram slijevanja sustava magnezij-aluminij. Na dijagramu je označena koncentracija od 9 % Al pri čemu je slitina eutektičkoga tipa očvršćivanja. U području preradbe ta slitina ima široki interval očvršćivanja. U dijagramu je označena preradbeni temperatura (595 °C), što je nešto niže od likvidus linije. Slitina navedenoga omjera aluminija prema magneziju pri toj je temperaturi u čvrstastom stanju. Sferoidalni primarni kristali nalaze se u rastaljenoj osnovi faze nižega tališta.



SLIKA 2. Dijagram slijevanja sustava magnezij-aluminij¹
FIGURE 2. Phase diagram for Mg-Al¹

Kada se tako pripremljen materijal podvrgne djelovanju tlaka dolazi do sniženja prividne viskoznosti (tikotropija): metal se ubrizgava u kalupnu šuplinu.

Na slici 3 prikazana je mikrofaska snimka ispitka slitine AZ91.⁵ Ispitak je izrezan iz otpreska načinjenoga tikotropnim injekcijskim prešanjem. Vide se primarne sferoidalne globule, koje su ravnomjerno raspoređene u eutektičkoj osnovi.



SLIKA 3. Mikrofaska snimka ispitka načinjenoga tikotropnim injekcijskim prešanjem od slitine AZ91⁵
FIGURE 3. Micrographic picture of thixomoulded specimen made from alloy AZ91⁵

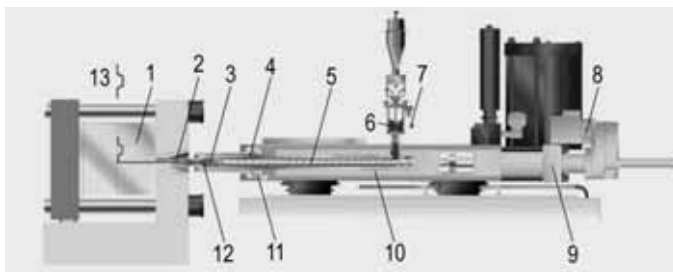
Opis postupka i ubrizgavalica^{4,1} / Description of procedures and injection moulding machines^{4,1}

Pri tikotropnome se injekcijskom prešanju Mg-slitine dobivaju u obliku granula načinjenih odvajanjem iz hljebaca ili blokova. Iz lijevka ubrizgavalice dozira se potrebna količina s pomoću dozirnoga pužnoga vijka u cilindar za taljenje. Prostor unutar lijevka s granulama i cilindra za taljenje s pužnim vijkom i mlaznicom te kalup, ispunjeni su argonom da se spriječi oksidiranje slitine.

Za uspješnu preradbu potrebno je Mg-slitinu zagrijati do čvrstastoga stanja koju se vrtnjom pužnoga vijka potiskuje u sabirnicu. To omogućuje da se taljevina ubrizga u kalupnu šuplinu.

Slika 4 prikazuje jedinicu za ubrizgavanje i kalup za tikotropno injekcijsko prešanje magnezijevih slitina.

U kalupnoj šuplini taljevina hlađenjem očvršćuje u otpresak. Klasične tlačne ljevalice podesne za tikotropno tlačno lijevanje nije potrebno posebno opisivati. Poznate su i opisane u mnogim literarnim izvorima.⁹



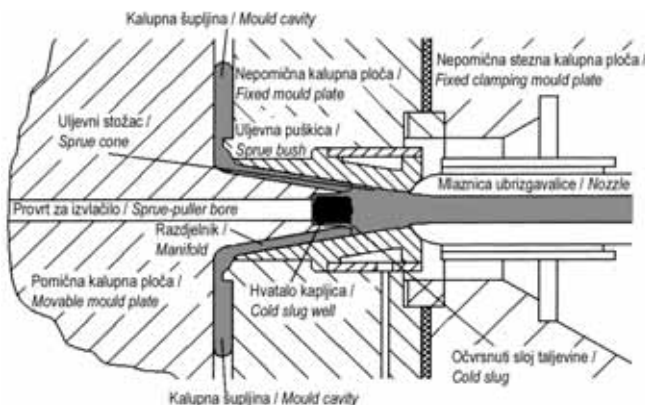
SLIKA 4. Jedinica za ubrizgavanje i kalup za tiksotropno injekcijsko prešanje:⁴ 1 – kalup, 2 – mlaznica, 3 – nepovratni ventil, 4 – bimetalni cilindar, 5 – pužni vijak, 6 – magnezijeve granule, 7 – inertni plin, 8 – servomotor, 9 – visokobrzinska jedinica za ubrizgavanje, 10 – grijača spirala, 11 – oslonac cilindra, 12 – taljevine (560 – 595 °C), 13 – otpresak

FIGURE 4. Injection unit and mould for thixomoulding⁴: 1 – mould, 2 – nozzle, 3 – non return valve, 4 – bimetallic barrel, 5 – screw, 6 – magnesium chips, 7 – inert gas, 8 – servo motor, 9 – high speed injection unit, 10 – heat coils, 11 – barrel support, 12 – slurry temperature (560 – 595 °C), 13 – moulding

Kalupi za tiksotropno injekcijsko prešanje¹ / Moulds for thixomoulding¹

Kalupe za ovaj postupak preradbe Mg-slitina odlikuje nekoliko pojedinosti u odnosu na kalupe za injekcijsko prešanje plastomera.

Na početku faze ubrizgavanja na vršku se mlaznice nalazi hladni čep koji sprječava oksidiranje taljevine. Ta količina materijala prva ulazi u kalup i stoga se mora konstruirati posebno oblikovani zdenac za prihvata te taljevine (slika 5).



SLIKA 5. Uljevni sustav sa zdencom za prihvat hladnoga čepa¹
FIGURE 5. Runner systems with cold slug¹

Pri tiksotropnome injekcijskom prešanju presjeci uljernih sustava su nekoliko puta veći nego kod kalupa za klasično tlačno lijevanje. Temperature stijenke kalupne šupljine relativno visoke, od 150 do 320 °C. Zbog vrlo visokih toplinskih svojstava Mg-slitina ciklusi su relativno kratki. Istodobno to znači da pretežni dio potrebne topline za zagrijavanje materijala potječe od grijača (konvektivno zagrijavanje) dok je udio pretvaranja mehaničkoga rada trenja u toplinu i zbog smičnih naprezanja nizak.

Linija za tiksotropno injekcijsko prešanje^{6,7} / Line for thixomoulding^{6,7}

Modernu liniju za izradbu tiksotropno injekcijski prešanih dijelova, osim ubrizgavalice, kalupa i temperirala čine: uređaj za dodavanje materijala u dozator, manipulator s mlaznicama za premazivanje

kalupa, sustav za automatsko podmazivanje pomičnih dijelova kalupa, manipulator za vađenje otpresaka, transporter za odnošenje i naknadno hlađenje otpresaka kao i odsisni sustav sa filtriranjem zraka. Prosječni proizvodni kapacitet takvih linija je oko 150 t otpresaka godišnje.

Prednosti i nedostaci tiksotropnoga injekcijskoga prešanja⁶ / Advantages and disadvantages of injection thixomoulding⁶

Tiksotropno injekcijsko prešanje u usporedbi s ostalim ljevačkim postupcima ima niz prednosti ali i nedostataka. Uspoređivanje će se izvršiti u okviru ljevačkih postupaka u trajnim kalupima.

Prednosti tiksotropnoga injekcijskoga prešanja jesu:

- ubrizgavanje taljevine u kalup je gotovo bez turbulencija, bez zarobljavanja zraka, nisko je stezanje dakle i skupljanje, otpresak je homogen i bez pora
- pri ovome postupku nepotrebno je rastaljivanje metala i držanje taljevine u pećima, pa nema šljake i problema oko skrbi za šljaku, a proces injekcijskoga prešanja je pojednostavljen s bitno manjim odmetkom (škartom)
- temperatura je ubrizgavanja bitno niža. To smanjuje pojavu usahline i pora. Zbog manje temperaturne razlike između temperature taljevine i stijenke kalupne šupljine (toplinski udar) vijek trajanja kalupa je 2 do 3 puta dulji, a vrijeme ciklusa kraće
- površina otpreska je kvalitetnija te najčešće otpreske nakon izradbe ne treba doradivati; površinske su greške u pravilu rjeđe
- debljina stijenke otpreska kod Mg-slitina može biti 0,5 mm, uz toleranciju dimenzija od $\pm 0,013$ mm
- konstrukcija otpreska može biti kompliciranija, jer različitosti u debljini njegove stijenke gotovo ne utječu na pojavu pogrešaka (usahline, poroznost), što omogućuje optimiranje oblika otpreska i sniženje njegove mase
- zbog fine, jednoličnije mikrostrukture, mehanička svojstva otpreska su viša
- postupak je tiksotropnoga injekcijskoga prešanja visoko automatiziran
- proizvodnost je viša i do 20 %, proces je energijski ekonomičniji (ušteda energije je veća od 50 %), a troškovi proizvodnje su do 20 % niži u odnosu na tlačno lijevanje toga materijala
- metal se tali u jedinici za taljenje ubrizgavalice, proces je sigurniji (nije potrebna zaštita plinom SF6), a zagađenje okoline je bitno manje
- prednosti postupka injekcijskoga prešanja omogućile su njegovo proširenje i na elektronsku industriju, industriju uređaja za zabavu, telekomunikacije, proizvodnju dijelova računala i sl.

Istodobno su zapaženi i nedostaci tiksotropnoga injekcijskoga prešanja. To su:

- visoka ulaganja u potrebnu opremu, viša je cijena materijala i kalupa
- još uvijek je nedovoljno poznavanje pojedinosti procesa tiksotropnoga injekcijskoga prešanja. Nedostaje iskustvo pri razvoju novih otpresaka, nedovoljno se poznaju zakonitosti konstruiranja i izradbe potrebnih kalupa, a nedostaju i stručnjaci koji bi omogućili prošireniju primjenu toga postupka
- pri tiksotropnome injekcijskom prešanju čest je hladni zavar koji se uklanja preciznim održavanjem potrebne temperature

taljevine i stijenske kalupne šupljine. Još se javljaju pogreške nepopunjenosti kalupa i tople napukline

- nedostatak iskustva o procesu tiksotropnoga injekcijskoga prešanja zahtijeva višu razinu znanja uposlenih
- nerazvijena prateća industrija, kao industrija proizvodnje materijala i ostalih potrebnih tvari, strojeva, kalupa i druge potrebne opreme, povisuje troškove proizvodnje i usporava razvoj
- još su uvijek potrebna veća sredstva za istraživanje i razvoj toga postupka.

Očekuje se da će se mnogi nedostaci tiksotropnoga injekcijskoga prešanja ukloniti već tijekom ovoga desetljeća.

Budućnost tiksotropnoga injekcijskoga prešanja⁵ / Future of thixomoulding⁵

U 2002. godini u svijetu je tiksotropnim injekcijskim prešanjem prerađeno oko 200 000 tona metala. Najviše se tim postupkom prerađuje u SAD-u, Kanadi i Japanu. U Europi je postupak najprošireniji u Njemačkoj, Engleskoj, Belgiji i Francuskoj. Prema pred-

viđanjima do 2020. svjetska proizvodnja magnezijjskih otpresaka načinjenih tiksotropnim injekcijskim prešanjem narast će na preko pola milijuna tona godišnje. Tako veliki relativni rast ukupne svjetske proizvodnje ne očekuje se kod ostalih postupaka lijevanja metala.

Literatura / References

1. Johannaber, F., Michaeli, W.: *Handbuch Spritzgießen*, Hanser Publishers, München, Wien, 2002, 650–657.
2. Alger, M.: *Polymer Science Dictionary*, Elsevier Applied Science, London 1989, 479.
3. Ibid., 22.
4. N. N. *Thixosystems*, prospekt, Husky, Bolton, 2002.
5. Siegert, K., Leiber, R.: *SEA Paper 980456*, SEA International, Warendal, Pa, 1998.
6. LeBeau, S., Decker, R., Walukas, D.: *What is Thixomoulding*, Technical papers, <http://thixomat.com/press.asp>, 12. 2. 2004.
7. Arbour, A.: *Thixomoulding Changing the Face of Products Worldwide*, <http://thixomat.com/pressinto.htm>, 12. 2. 2004.
8. Kirkwood, D. H.: *Semisolid Processing of High Melting Point Alloys*, 4th International Conference on Semi-Solid Processing of Alloys and Composites, Sheffield, 1996, 320–325.
9. Čatić, I., Johannaber, F.: *Injekcijsko prešanje polimera i ostalih materijala*, Društvo za plastiku i gumu, Zagreb, 2004, 104–114.

DOPISIVANJE / CORRESPONDENCE

Mr. sc. Zdravko Žagar
Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje
Ivana Lučića 5
HR-10000 Zagreb, Hrvatska / Croatia
Tel.: +385-1-61-68-222, Faks: +385-1-61-56-940
E-mail: zdravko.zagar@fsb.hr

Posljednje vijesti

Priredili: Igor ČATIĆ, Gordana BARIĆ i
Maja RUJNIĆ SOKELE

Etažni kalup s dvostrukim okretanjem

Ferromatik K-TEC tvrtke *Milacron* dvokomponentna je ubrizgavalica koja može izraditi dva precizna dijela od dva različita materijala, obilježiti ih, te složiti u gotovi proizvod. Novi sustav etažnoga kalupa s dvostrukim okretanjem tvrtke *Foboha* poboljšani je sustav etažnoga okretnoga kalupa, razvijenoga u suradnji s tvrtkama *Milacron* i *Foboha*. Sekundarna jedinica za ubrizgavanje postavljena je pod kutom od 45° na vrhu pomične ploče, što zahtijeva manje prostora, a što je još važnije, smanjuje vrijeme ciklusa budući da omogućava mlaznici ubrizgavalice da ostane spojena s vrućim uljevnim sustavom tijekom zatvaranja.

Ubrizgavalica *K-TEC* dostupna je u veličinama od 400 do 4 500 t, a osobito je pogodna za postavljanje kockastoga etažnoga kalupa. Osnovna izvedba ubrizgavalice može se spojiti s najviše šest jedinica za ubrizgavanje različitih veličina, za injekcijsko prešanje otpresaka većih dimenzija i manjih otpresaka druge boje ili vrste materijala. Svaku jedinicu za ubrizgavanje može se posebno odabrati i podesiti parametre ubrizgavanja, a sustav upravljanja nadzire i upravlja svim operacijama.

Okretni etažni kalup pogodan je za velike i male proizvode, a izmjena je kalupa jednostavna budući da su svi vodovi, kabeli i priključci integrirani u sustav i ne moraju se ponovno spajati pri svakoj izmjeni kalupa.

Na *K-TEC* ubrizgavalici moguće je izrađivati razne proizvode, primjerice ambalažu, dječje igračke (slika 1) te medicinske, kozmetičke, elektroničke i optičke dijelove.



SLIKA 1. Primjer primjene K-TEC ubrizgavalice

Plastics Engineering 61(2005)3

PVC u umjetnosti

Umjetnički i životni par Christo i Jeanne-Claude dokazani su ljubitelji i zaštitari prirode, ali i veliki uporabnici i potrošači plastike. Osobito su se proslavili omatanjem plastičnom folijom raznih objekata poput, npr. berlinskoga *Reichstaga*. Njihova je pak posljednja manifestacija proglašena najvećim javnim umjetničkim projektom u povijesti New Yorka. Radilo se o projektu pod nazivom *The Gates* (Vrata) koji je započeo 12. veljače i trajao 16 dana. Mjesto je održavanja bio njujorški *Central Park*.

Jedna od osobitosti projekta bilo je 7 500 otvorenih vratnica visokih oko 5 metara načinjenih od oko 100 km poli(vinil-kloridnih, PVC) profila (slika 2)! Dakle, od danas već uobičajenoga materijala za izradbu vrlo proširenih prozorskih profila ili cijevi za pitku vodu. Sve su vratnice bile obojene u jarku narančastu boju i ukrašene debelom trakom tkanine boje šafrana. Vratnice su se protezale na 37 kilometara staza *Central Parka*.



Slika 2. Dio izložbe *The Gates* u njujorškom *Central Parku*

Ono što oduševljava: *po završetku projekta vratnice su nestale*. Upućene su na zbrinjavanje, mehaničku odnosno materijalnu uporabu, tj. recikliranje. Izbor PVC-a bio je obrazložen upravo teškom zapaljivošću i gorenjem te pouzdanim i laganim recikliranjem. Međutim, uz PVC potrošene su i velike količine poliamida (popularnoga najlona), polipropilena i žilavoga polistirena. I iskorišteni proizvodi od tih materijala uspješno su oporabljjeni.

www.christojeanneclaude.net,
www.voa.gov